

Vanadio en celdas redox con flujo. Estado actual: Una revisión (parte B)

Vanadium in redox flow cells. Current status: A review (part B)

Márquez, Jairo¹; Márquez, Olga^{1*}; Weinhold, Elkis¹; Márquez, Keyla²; Balladores, Yanpiero³

¹Laboratorio de Electroquímica, Departamento de Química Facultad de Ciencias Universidad de Los Andes– Mérida 5101 – Venezuela., ²Núcleo Universitario Alberto Adriani Facultad de Ingeniería., El Vigía 5145, Mérida – Venezuela.

³Laboratorio de Materiales para Tecnologías Emergentes (LaMTE). Centro de Investigación y Tecnología de Materiales (CITeMa) Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) San Antonio de Los Altos 1020-A. Venezuela
olgamaq@gmail.com,

Resumen

Las baterías redox con flujo (BRF) y en particular la batería redox de Vanadio con flujo (BRVF) son reconocidas y aceptadas como medios apropiados para almacenamiento energético en sistemas estáticos y se obtienen actualmente resultados exitosos en almacenamiento no estacionario de energía procedente de distintas fuentes. Los sistemas de almacenamiento de energía la suministran posteriormente cuando ésta es requerida, siendo capaces de equilibrar la oferta y demanda, actuando como generación flexible cuando sea necesario. Característica funcional importante de una tecnología de almacenamiento es la combinación de potencia y capacidad, actualmente se manejan estaciones BRVF de MW y MWh en potencia y capacidad. Son también importantes su tiempo de respuesta, no contaminación, flexibilidad, rapidez de respuesta, etc. Estas características, la flexibilidad y gran capacidad hacen de la BRVF una tecnología prometedora para el almacenamiento a gran escala de energía y en aplicaciones que suavicen el perfil generador de sistemas inestables como las renovables o también, para completar incrementos repentinos en la demanda. Todas ellas, son características favorables para esos fines, y aunque adolecen de algunas limitaciones, en otras aplicaciones, almacenamiento no estacionario, hay actualmente un intenso estudio, que nos conduce a resultados favorables, que son expuestos en el texto a continuación. Está relacionado con el tópico de actualidad de los vehículos eléctricos y el papel de las baterías redox con flujo, en particular la batería redox de Vanadio y sus aportes en forma conjunta con energías renovables, por accesibilidad, almacenamiento y suministro permanente de esta energía, el saneamiento ambiental y una progresiva reducción de costos.

Palabras clave: Celda Redox de Vanadio, Almacenamiento de energía, Celdas de flujo, usos del Vanadio

Abstract

The redox flow batteries (RFB) and, in particular, the Vanadium redox flow battery (VRFB) are recognized and accepted as a suitable means for energy storage in static systems and successful results are currently obtained in non-stationary storage of energy from different sources. Energy storage systems, subsequently, supply energy when it is required, being able to balance supply and demand, acting as flexible generation when necessary. An important functional characteristic of a storage technology is the combination of power and capacity; currently VRFB stations of MW and MWh in power and capacity are managed. Equally important are: its response time, non-contamination, flexibility, fast response, etc. These characteristics, flexibility and high capacity make VRFB a promising technology for large-scale energy storage and in applications that smooth the generator profile of unstable systems such as renewables or also to supplement sudden increases in demand. All of them are favorable characteristics for these purposes, and although they suffer from some limitations, in other applications, non-stationary storage, there is currently an intense study, which leads one to favorable results, which are described in along this paper. It is referred to the current topic of electric vehicles and the role of redox batteries with flow, in particular the Vanadium redox battery and its contributions linked to renewable energies, for accessibility, storage and permanent supply of this energy, environmental sanitation and a progressive reduction of costs.

Keywords: Vanadium redox cell, energy storage, flow cells, uses of Vanadium

1 Introducción

En la parte A de este trabajo, incluido en este número de la revista, se ha abordado los principios básicos de las baterías de flujo, con énfasis en las de Vanadio (Márquez y col., 2021). En relación con fuentes no estacionarias de energía, es necesario considerar algunos aspectos, así, vehículos eléctricos híbridos (motor eléctrico/energía fósil) están actualmente en el comercio, sin embargo, meta importante social lo constituye, la sustitución del uso de contaminantes al ambiente. Por ello es importante una rápida y progresiva disminución del uso de estos combustibles y la generación de electricidad desde fuentes alternativas de energía. Las celdas de combustible de hidrógeno (CCH) son consideradas una alternativa y de hecho ya están siendo aplicadas en estos sistemas (Díaz Castroverde 2005). Las baterías redox con flujo (BRF) aparecen también como alternativa y en forma similar, están actualmente bajo intenso estudio (Weber y col., 2011, Ponce de León y col., 2006). El medio electrolítico en estas baterías, es un fluido líquido que establece una separación entre los componentes, potencia y capacidad energética de la batería; ello ofrece la ventaja y permite la optimización por separado de estos componentes. La gran limitante que presentan es su baja densidad de energía ($20\text{-}35\text{ WhL}^{-1}$) y en consecuencia es el gran tema de su estudio (Cristóbal 2015, Chen y col., 2011, Leung y col., 2012). Para ello se requiere optimizar la química, componentes, composición, diseño mecánico de la batería. Mejoras se han conseguido con modificaciones al electrolito (Li y col., 2010), incorporación de nanoelectrocombustible (Katsoudas y col., 2014), y se consideran mejoras en características del flujo, mejoras en transferencia de calor, electrodos tridimensionales muy cercanos entre sí; ubicación, tamaño y diseño de batería en el vehículo, etc. Las baterías redox de flujo (BRF) pueden funcionar en forma similar a las celdas de combustible regenerativas (CCR) pues el proceso de producción de potencia es similar, aunque los flujos de electrolito en las celdas difieren entre sí. Las celdas de combustible consumen hidrógeno y oxígeno para producir agua y electricidad. Las celdas de combustible regenerativas son también capaces de separar el agua en sus componentes hidrógeno y oxígeno; el hidrógeno es entonces almacenado como gas hidrógeno o como metanol para suministrar energía cuando sea requerida (generación futura de electricidad), mientras que una BRF con suministro permanente de electrolito cargado (por cualquiera de las vías posibles) o recarga de electrolito in situ (sin agotamiento del suministro), es una celda con suministro permanente de energía. Las investigaciones conducen a la utilización de celdas de combustible tipo PEM (celdas de membrana de intercambio de protones), con hidrógeno o metanol como almacenante (Díaz 2005), también se estudian otras celdas de flujo (Roe y col., 2016, Wu y col., 2017, Noack y col., 2016, Wei y col., 2017, Mousavihashemi y col., 2018) El

reto es diseñar un sistema eficiente en ambas direcciones. Actualmente, un tópico importante de estudio lo constituye el incremento en suministro de energía; en estas celdas con flujo, sin que ello implique un aumento en el tamaño de reservorios (volumen de electrolitos) y también su aplicabilidad en nuevas áreas de interés. De hecho, ya algunos países han estado tratando esta temática en años recientes.

La batería redox de Vanadio tiene características adicionales de importancia tales como: simplicidad, costo competitivo y ausencia de emisiones de sustancias tóxicas. En la batería redox de Vanadio, la reacción ocurre entre dos electrolitos y en consecuencia no existe electrodeposición, ni pérdida de material electroactivo cuando la batería es repetidamente ciclada. Las baterías redox de Vanadio son de relativamente bajo costo y bajo impacto ambiental, alto ciclo de vida, reacciones redox simples y reversibles, funcionamiento a temperaturas moderadas, alta eficiencia energética y pueden ser recargadas mecánicamente (por cambio del medio electrolítico) o eléctricamente, en corto tiempo. Se presentarán acá, aspectos relacionados con la posibilidad de incorporación de celdas de flujo en transporte vehicular, con suministro de energía exsitu e insitu, para su funcionamiento.

2 Transporte vehicular

Con los adelantos en almacenamiento y suministro energético, se han logrado vías para ampliar la aplicabilidad de sistemas y procesos electroquímicos, es así que se habla ahora con naturalidad sobre la utilización de baterías redox con flujo en transporte vehicular. Las baterías de flujo son de recarga rápida y segura en vehículos eléctricos, por intercambio del electrolito. Es una ruta práctica y eficiente para suministro al transporte, con bajo costo de operación. Alcanza una densidad de energía en el electrolito de 25 Wh/l , similar a la batería Pb-ácido industrial. El sistema de recarga vehicular debe bombear, simultáneamente, electrolito cargado desde la estación al vehículo, mientras que el electrolito descargado es extraído de éste. La BRVF y cualquier batería de flujo, con electrolito mejorado (densidad de energía del electrolito apropiada) funcionarán. La celda la conforman: Tanques dobles, Anolito y Catolito; con membrana interna móvil c/u, que separan electrolito cargado del descargado. Los tanques son sellados a la atmósfera y siempre llenos, la ventilación es eliminada y los volúmenes minimizados a bordo del vehículo y en la estación base. Llevan acopladas un interruptor de cuatro vías (dos de entrada y dos de salida), también incorpora un puerto con válvulas selectivas que aseguran que los puertos apropiados del tanque estén alineados antes de que comience el bombeo de combustible.

3 Materiales y Métodos

Combustible seguro, eléctrico, no-inflamable, permite una alta velocidad de flujo y transferencia de energía equivalente a 600 kW. El electrolito es energizado continuamente en la estación de llenado, con energía eólica, solar, red eléctrica, etc., de acuerdo a la disponibilidad.

Otro ejemplo lo constituye el sistema 200 kW / 400kW de la batería redox de Vanadio (Bryans y col., 2018). El sistema utiliza el exceso de energía obtenida de fuentes renovables, para el suministro de energía a la comunidad,

carga eléctrica para baterías en vehículos, para electrolizadores en la producción de hidrógeno como combustible en celdas de combustible para vehículos. Tiene la ventaja de flexibilidad y movilidad, tiene una eficiencia en energía 70-90% y puede ser sobrecargada o sobredescargada, sin daños al sistema. Este sistema de almacenamiento es apropiado para el almacenaje de energía intermitente, para alimentar una estación fuente de potencia (50 kW) para electrólisis, o para el recargado de vehículos eléctricos. Características de la batería, diseño, composición, funcionamiento, en la referencia (Bryans y col., 2018), (figura 1).

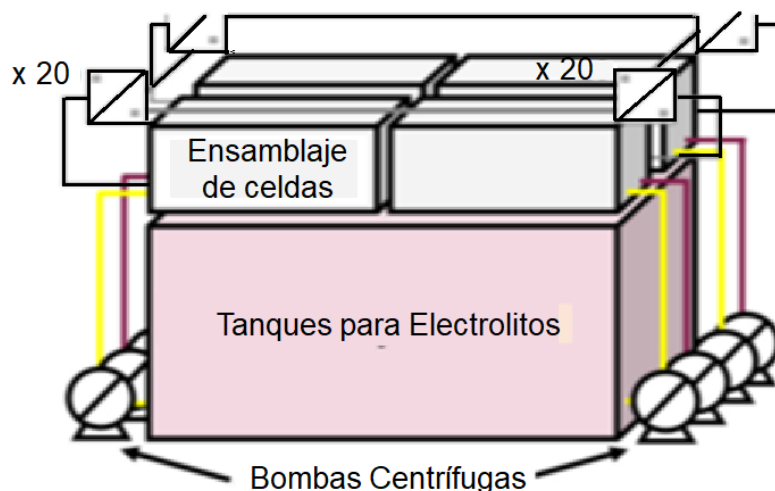


Fig. 1. Sistema de Almacenamiento de Energía BRVF con varios fines, incluyendo el vehicular (Bryans D y col., 2018).

Los sistemas de baterías de flujo adolecen de una muy importante característica y es, una capacidad única de rápido rellenado de tanques electrolíticos. Estas baterías tienen otras múltiples ventajas, ya expresadas en el texto, que vislumbran múltiples aplicaciones; sin embargo, a causa de la baja energía específica de los electrolitos (baja solubilidad de sales redox) su aplicación en transporte no ha sido considerada en profundidad y han tenido un mayor desarrollo en aplicaciones estacionarias. Se ha determinado que el mínimo requerimiento de densidad de energía para una batería de flujo en vehículos eléctricos es de 260 Wh/l (150 Wh/kg). La aplicación de la nanotecnología de fluidos en baterías de flujo ha permitido crear una batería recargable en forma líquida (Katsoudas y col., 2014). El diseño de la batería emplea un nano electrocombustible, líquido, en el cual están suspendidas nano partículas permanentemente, que pueden ser cargadas y descargadas muchas veces en la batería de flujo. La batería de flujo con nano electrocombustible opera a relativa alta capacidad, con seguridad térmica, alta eficiencia, flexibilidad, adaptabilidad, y más bajo costo. Suministra un incremento en la densidad de energía volumétrica 10 a 30 veces superior que los electrolitos

redox tradicionales (Katsoudas y col., 2014). Las baterías de flujo con nanoelectrocombustible pueden ubicarse en cualquier sitio en el vehículo eléctrico y los tanques de almacenamiento de cualquier forma o tamaño razonables. Las baterías de flujo redox (BFR) que utilizan electrolitos líquidos son alternativas atractivas a las celdas de combustible de hidrógeno. La separación entre parámetros de potencia y energía en ellas, permite su optimización por separado, para un apropiado funcionamiento y configuración vehicular. Ello entusiasma a los científicos e ingenieros en la profundización de las investigaciones en celdas de combustible de hidrógeno por la posibilidad de una rápida recarga de combustibl utilizando como suplidor una fuente externa (Mohamed y col., 2009).

Con las ventajas de un costo moderado, modularidad, transportabilidad y flexibilidad (Ponce de León y col., 2009), las celdas redox de Flujo pueden suministrar la tecnología a ser utilizada por un sistema que suministre los requerimientos en potencia de un vehículo. HEVs (vehículos eléctricos híbridos) es actualmente competidor de BEVs (vehículos eléctricos con baterías) (Bitsche y col., 2004). Habrá un corrimiento hacia el plug-in HEV (PHEV) (Lipman y col., 2006), mayor

generador/motor eléctrico (EMG) y mayores baterías cargadas desde una fuente externa.

En relación a BRVF, se consiguen mejoras, aumentando la solubilidad del Vanadio con el uso de electrolitos modificados, mejoras en el empaquetamiento, optimización en el diseño de celda, reduciendo espacio entre placas y mejorando la transferencia de calor; control total y manejo de (BRF) y reducción de costos. Usando electrolitos modificados es posible incrementar la concentración de los reaccionantes y mejorar la densidad de energía (Márquez y col., 2012, 2015). La corriente y densidad de potencia pueden mejorarse, con mejoras en la transferencia de calor y características del flujo. Electrodo tridimensionales y muy cercanos entre sí pueden mejorar la densidad de potencia de la celda. Las baterías redox de Flujo (BRF) tienen la ventaja de rápida carga por reemplazo del electrolito, que las hace atractivas para utilización en vehículos eléctricos e híbridos.

Actualmente es posible el uso de vehículos eléctricos en distancias cortas, transporte público local y con mejoras en infraestructura, distancias mayores podrán pronto ser cubiertas. Grandes mejoras serán obtenidas con seguridad, si la investigación en el área continua en desarrollo.

Actualmente las principales alternativas a motores de combustión interna (MCI) son los vehículos eléctricos (VEs) y vehículos eléctricos híbridos (plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs)) (Boulanger y col., 2011). Son variadas las tecnologías de almacenamiento de energía para atender estos requerimientos, cada uno con limitaciones, sin embargo, las baterías redox con flujo tienen una ventaja relevante constituida por su total independencia entre capacidad de energía y límite de potencia (Hagedorn y col., 1982). También es ventaja, la naturaleza líquida del medio electroactivo y su almacenaje en tanques, de forma y tamaños apropiados. Se han estudiado varios tipos de baterías redox con flujo y diferentes pares redox (Wang y col., 2013) y entre ellos, la batería redox de Vanadio (BRVF) ha sido de mayor interés, ésta usa el mismo material en las medias celdas, evitando filtración a través de la membrana y evitando daños a la batería (Skylas-Kasakos y col., 1988).

En estas condiciones, el tiempo requerido para la carga de un VE sería del mismo orden de magnitud requerido por vehículos convencionales. Adicionalmente, el almacenamiento local de energía contribuiría a la solución de problemas asociados al manejo de la energía eléctrica de red y permitiría la incorporación de fuentes de energía renovable intermitente (eólica, solar, etc.) con la consecuente reducción en contaminación (Cunha y col., 2016). La figura 2 presenta un esquema simple de estación de alimentación energética vehicular, desde una celda redox de Vanadio con flujo y distintas fuentes energéticas de suministro (primarias renovables y secundaria).

En un sistema convencional, la energía eléctrica que puede provenir de una fuente renovable, se utiliza para producir hidrógeno en un electrolizador. Una vez producido el hidrógeno, se puede almacenar de las diversas formas conocidas. Finalmente, para revertir el proceso y obtener de nuevo energía eléctrica, es necesario hacer pasar el hidrógeno por una pila de combustible, equipo que transforma la energía química del hidrógeno, combinándolo con oxígeno (o aire, que contiene oxígeno), en energía eléctrica y dando como residuo agua en estado líquido o gaseoso.

La pila de combustible de óxido sólido reversible es un dispositivo que puede funcionar de manera eficiente tanto en modo celda de combustible como en modo electrolizador. Se puede observar su funcionamiento en la figura 3.

El sistema redox hidrógeno-oxígeno del agua puede ser usado en baterías redox. Desde el punto de vista tecnológico, la primera opción es acoplar una celda electrolizadora de agua y una pila de combustible de H₂/O₂. Este tipo de dispositivo en tándem puede almacenar electricidad disociando las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno por separado, y volver a “generar” dicha electricidad mediante la combustión “fría” del hidrógeno y el oxígeno en una celda de combustible. La celda de combustible PEMFC es también muy estudiada en la actualidad.

Una segunda opción y más desafiante aún es combinar el electrolizador de agua y la pila de combustible en una misma unidad que pueda operar reversiblemente. Dicho dispositivo se denomina celda de combustible regenerativa unificada (URFC – Unitized regenerative fuel cell) o pila de combustible reversible. Esta es básicamente una batería redox que funciona de manera reversible, ya sea como un sumidero de energía (modo de electrólisis del agua para la carga de la batería) o como una fuente de energía (modo de celda de combustible equivalente a la descarga de la batería). La capacidad de este dispositivo es potencialmente ilimitada, ya que está determinada por el tamaño de los depósitos de hidrógeno y oxígeno.

La tecnología reversible en las celdas de combustible es un gran avance ya que al ser la pila un sistema independiente (al ser reversible) que puede realizar las dos funciones principales, producción de hidrógeno y producción de electricidad, aumenta en gran medida las posibilidades de uso de estos sistemas.

La BRVF es un dispositivo que puede funcionar de manera eficiente en almacenamiento, conversión y suministro de energía. Se puede observar su funcionamiento en la figura 4. Se espera con investigaciones futuras, la carga y recarga vehicular directamente en éste, desde fuente eléctrica o renovable de suministro de energía.

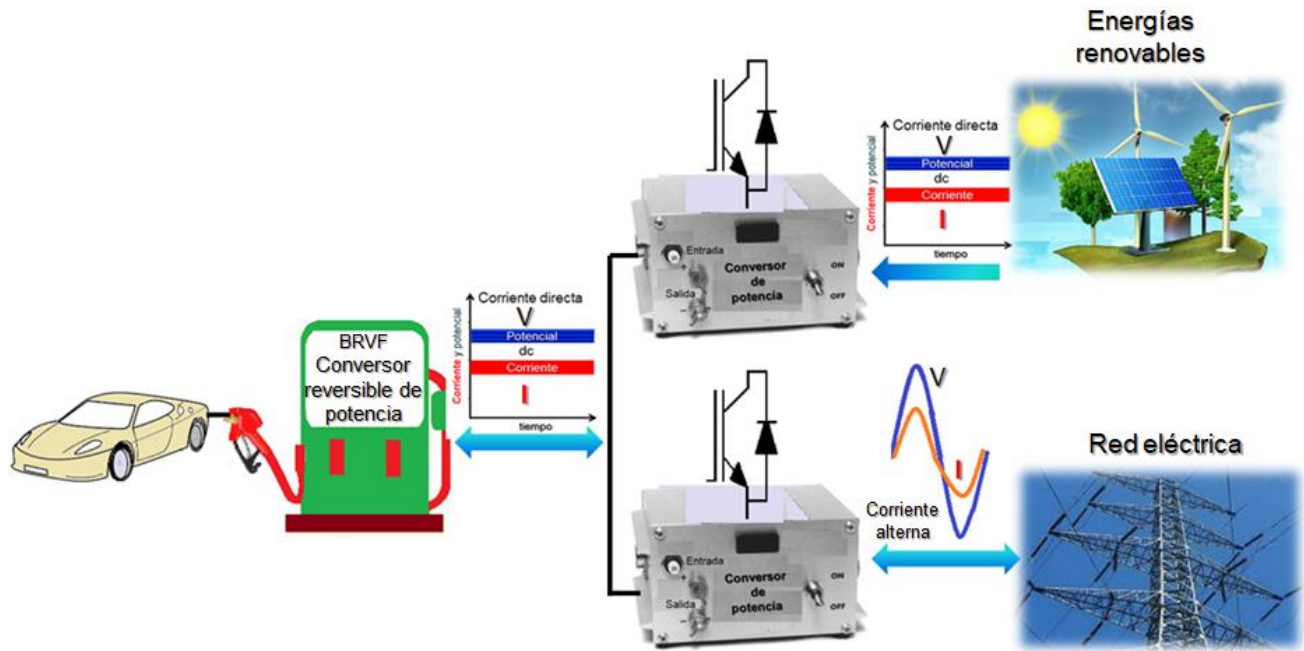


Fig. 2.- Estación de Alimentación energética vehicular desde una celda redox de Vanadio con flujo

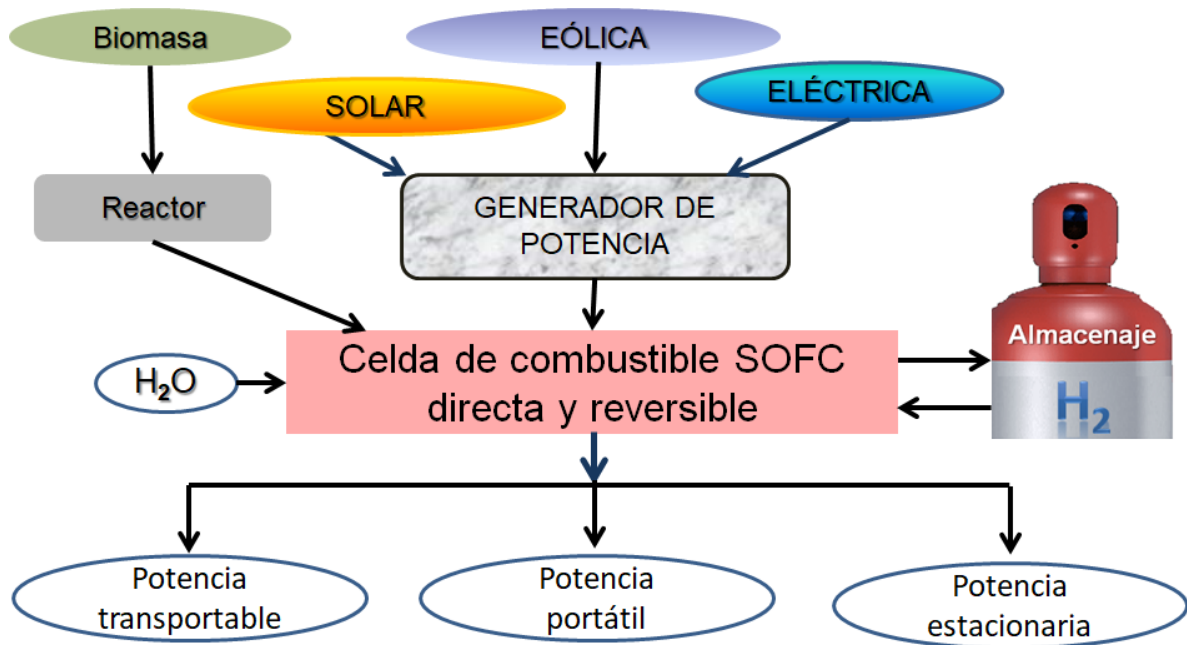


Fig. 3.- Esquema de funcionamiento de una Celda de Combustible de Óxido Sólido Reversible.

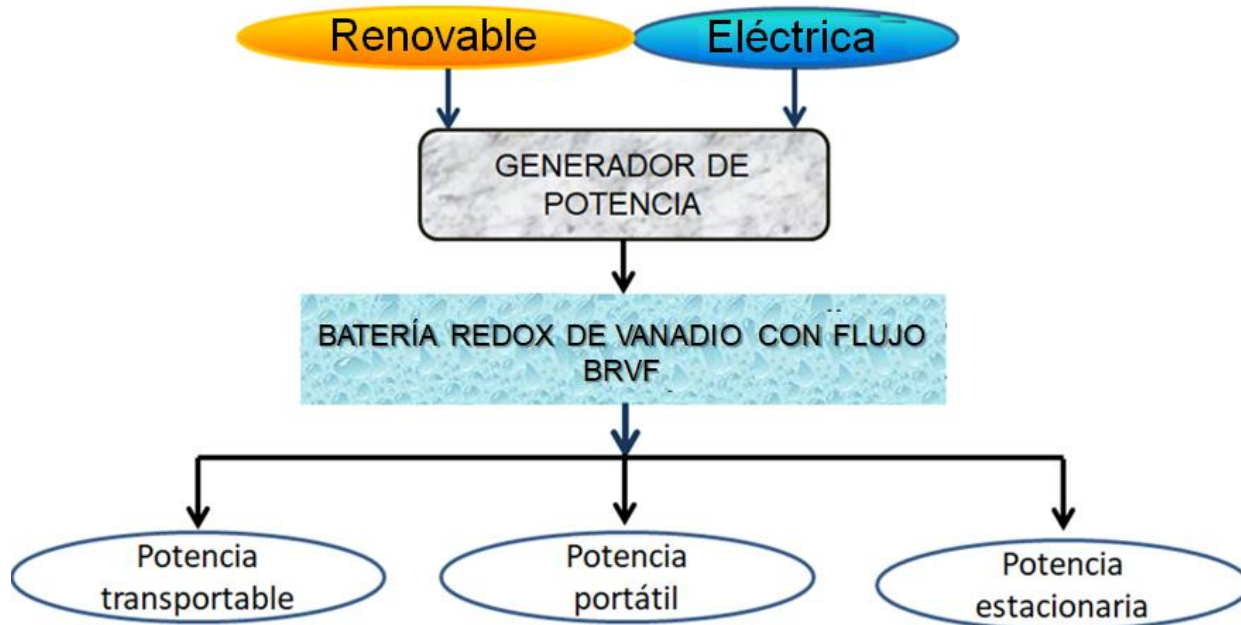


Fig. 4.- Esquema de Funcionamiento de una BRVF Reversible

El sistema es altamente flexible. Se requiere un incremento en solubilidad de especies de Vanadio. Se pueden utilizar tanques (doble tanque) de almacenamiento de forma y tamaño apropiados, alimentados con nanoelectrocombustibles, en medio electrolítico óptimo y ser posicionados según se desee con respecto al ensamblaje de celdas de flujo; ello es muy importante en vehículos eléctricos. Las baterías de flujo a su vez, pueden localizarse en cualquier sitio seguro del vehículo (previniendo colisiones) y tener cualquier forma (Katsoudas y col., 2014). Se debe considerar, la posibilidad de electronanocatalizadores y ajustes y modificaciones (volumen y área) en electrodos y diseño de celda. El gran problema a resolver, aunque no imposible, es la necesidad de un considerable incremento en la capacidad energética de la celda y en ese sentido, queda aún mucho trabajo en ser realizado.

3 Conclusiones

-Los sistemas de almacenamiento de energía son importantes ante el aumento, desarrollo, e implantación de fuentes de energía renovable descentralizadas y no completamente controlables. No sólo pueden ser una solución técnica para la gestión de la energía de la red, sino también, pueden aportar un mejor aprovechamiento de los recursos renovables en períodos de sobreproducción. En este sentido, la tecnología de baterías de flujo es una buena opción como sistema de almacenamiento de energía al día de hoy. Estas baterías se encuentran actualmente en pleno desarrollo.

-Los sistemas de baterías de flujo redox ofrecen una alta potencia y capacidad, elevado tiempo de almacenamiento de energía y un excelente tiempo de respuesta, pudiendo suministrar su potencia en pocos segundos. Estas propiedades son de gran relevancia para su uso tanto en sistemas de gestión de la energía: nivelación de la carga y reducción de los picos de generación eléctrica, como en gestión de la calidad de la red: estabilización de la tensión y la frecuencia.

-Las baterías de flujo pueden resultar muy atractivas para la mayoría de aplicaciones estacionarias, gracias a su alto ciclado, rendimiento y su casi nulo mantenimiento, pudiendo reemplazar a las baterías convencionales en sistemas de alimentación ininterrumpida (SAIs), o ser empleadas en combinación con fuentes de energía renovables, tales como los sistemas de generación de energía fotovoltaica y eólica.

-Las baterías de flujo redox estacionarias, combinadas con fuentes renovables de energía, son de alta aplicabilidad en sitios remotos, poco accesibles, aislados, sin acceso a la red eléctrica.

-Aunque las baterías redox con flujo, tienen limitaciones por su baja capacidad de almacenamiento de energía en el medio electrolítico, estudios e investigaciones se acercan a la posibilidad, de implementar en un futuro próximo la aparición de vehículos eléctricos alimentados exclusivamente, por ejemplo, en este caso, con la celda redox de flujo de Vanadio y con suministro energético desde distintas fuentes. Son posibles mejoras, con estudios adicionales de solubilidad de electrolitos, modificaciones y mejoras de empaquetamiento, estudios nanoelectroquímicos y nanocatalíticos, optimización en el

diseño de celda, mejoras en la transferencia de calor. En la actualidad ya existe la alimentación a estas baterías desde estaciones externas, habilitadas con tal fin. De hecho, las baterías redox con flujo y las híbridas, han estado siendo aplicadas estos últimos años en algunos países, y su perfeccionamiento continúa. Un reto a futuro ya siendo atendido, es la carga y recarga energética, en corto tiempo, directamente en el vehículo.

Agradecimiento

Al FONACIT, por financiamiento a nuestras investigaciones citadas y al LABORATORIO DE ELECTROQUÍMICA de la ULA, donde fueron realizadas

Referencias

Bitsche O, Gutmann G, 2004, Systems for hybrid cars " Journal of Power Sources Vol. 127, pp. 8-15.

Boulanger AG, Chu AC, Maxx S, 2011, "Vehicle Electrification: Status and Issues," Proceedings of the IEEE, pp.1116- 1138.

Bryans D, Amstutz V, Girault HH, Berlouis L, 2018, Characterisation of a 200 kW/400 kWh Vanadium Redox Flow Battery. Batteries, Vol. 4, pp. 54-69.

Cheng F, Liang J, Tao Z, Chen J, 2011, Functional materials for rechargeable batteries. Adv Mater Vol 23, No. 15, pp. 1695-1715.

Cristóbal Olivares JM, 2015, Estudios de aplicación óptima de Baterías de Flujo en redes de Distribución Eléctrica. Proyecto Ing. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Cunha Á, Martins J, Rodrigues N, Monteiro V, João L, Brito A, 2016, Assessment of the use of Vanadium Redox Flow Batteries for Energy Storage and Fast Charging of Electric Vehicles in Gas Stations, Energy, Vol. 115, No. 2, pp. 1478-1494, DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.118; journal article available at <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216301803>.

Díaz-Castroverde FG, 2005, Estudio de reversibilidad para Almacenamiento de Energía en una pila de Combustible Polimérica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI). Proyecto fin de carrera. Universidad Pontificia Comillas. Madrid. pp 1-146.

Hagedorn NH, Thaller LH, 1982, Design Flexibility of Redox Flow Systems, National Aeronautics and Space Administration Lewis Research Center, DOE/NASA/12726-16, NASA TM-82854.

Katsoudas JP, Timofeeva EV, Segre CU, Singh D, 2014, Integration of Flow Batteries into Electric Vehicles: Feasibility and the Future. NSTI-Nanotech, pp. 434-438. www.nsti.org, ISBN 978-1-4822-5830-1 Vol. 3.

Laguna A, Márquez K, Montilla M, Alarcón D, Márquez OP, Márquez J, Manfredy L, 2018, La Celda y la Batería Redox de Vanadio. RITE. Vol. 1, No. 1, pp. 22-38.

Leung P, Li X, De León CP, Berlouis L, Low CJ, Walsh FC, 2012, Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage. RSC Advances Vol. 2, No. 27, pp. 10125-10156.

Li L, Kim S, Wang W, Yang G, Vijayakumar M, Nie Z, Chen B, Zhang J, Hu J, Graff G, Liu J, Yang G, 2010, A New Vanadium Redox Flow Battery Using Mixed Acid Electrolytes. Pacific Northwest National Laboratory, Vol. 0, pp. 1-20

Lipman TE, Delucchi MA, 2006, A retail and lifecycle cost analysis of hybrid electric vehicles, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 11, pp. 115-132.

Márquez J, Márquez OP, Weinhold E, Márquez K, Balladores Y, 2021-A, Vanadio en celdas redox con flujo. Estado actual: Una revisión (parte A). Revista Ciencia e Ingeniería, esta edición.

Márquez J, Márquez OP, 2012a, Electrochemical synthesis of micro- and nano-electrodes and arrays. Analytical applications. Chapter 1 in Recent Advances in Electrochemistry. Transworld Research Network, Kerala, India. Tremont R (Ed.), pp. 1-37.

Márquez J, Márquez OP, 2012b, Solar Energy and Electrochemistry. In Recent Advances in Electrochemical Research. Tremont, R. J. Transworld Research Network. (Ed), pp. 169-222

Márquez J, Márquez OP, 2015, Nanotecnología y Electroquímica. En: Nanotecnología: Fundamentos y Aplicaciones. Lárez C (Ed.). Avances en Química, Vol. 5, pp. 105-135, (edición especial).

Mohamed MR, Sharkh SM, Walsh FC, 2009, Redox Flow Batteries for Hybrid Electric Vehicles: Progress and Challenges. Research gate 550-557 978-1-4244-2601-0/09/\$25.00 ©2009 IEEE.

Mousavihashemi S, Murcia-Lopez S, Hosseini MG, Morante JR, Flox C, 2018, Towards production of a highly catalytic and stable graphene wrapped graphite felt electrode for vanadium redox flow batteries. Batteries, Vol.4, No.4, p.63. <https://doi.org/10.3390/batterie4040063>

Noack J, Cognard G, Oral M, Küttinger M, Roznyatovskaya N, Pinkwart K, Tübke J, 2016, Study of the long-term operation of a vanadium/oxygen fuel cell. J. Power Sources, Vol. 326, pp. 137-145.

Ponce de León C, Frías-Ferrer A, González-García J, Szánto DA, Walsh FC, 2006, Redox flow cells for energy conversion. J of Power Sources, Vol. 160, pp. 716-732.

Roe S, Menictas C, Skyllas-Kazacos MA, 2016, High energy density vanadium redox flow battery with 3 M vanadium electrolyte. J. Electrochem. Soc., Vol. 163, pp. A5023-A5028.

Skyllas-Kazacos M, Rychick M, Robins R, 1988, "All-vanadium redox battery," US Pat., 4 786 567.

Skyllas-Kazakos M, Rychcik M, Robins GR, Fane GA, Green MJ, 1986, New All-Vanadium Redox Flow Cell. *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 133, No. 5, pp. 1057-1058.

Wang W, Luo Q, Li B, Wei X, Li L, Yang Z, 2013, Recent Progress in Redox Flow Battery Research and Development, *Advanced Functional Materials*, Vol. 23, No. 8, pp. 970-986.

Weber AZ, Mench MM, Meyers JP, Ross PN, Gostick JT, Liu Q, 2011, Redox flow batteries: a review. *J Appl Electrochem.*, Vol. 41, pp. 1137-1164.

Wei L, Zhao TS, Zeng L, Zeng YK, Jiang HR, 2017, Highly catalytic and stabilized titanium nitride nanowire array decorated graphite felt electrodes for all-vanadium redox flow batteries. *J. Power Sources*, Vol. 341, pp. 318–326.

Wu MC, Zhao TS, Jiang HR, Zeng YK, Ren YX, 2017, High-performance zinc bromine flow battery via improved design of electrolyte and electrode. *J. Power Sources*, Vol. 355, pp. 62–68.

Recibido: 12 de febrero de 2021

Aceptado: 7 de mayo de 2021

Olga P. Márquez: *PhD en Electroquímica, Universidad de Southampton (UK). Profesora titular, en condición de jubilada en ejercicio, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida-Venezuela.* <https://orcid.org/0000-0001-6230-1456>

Jairo Márquez: *PhD en Electroquímica, Universidad de Southampton (UK). Profesor titular, en condición de jubilado en ejercicio, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida-Venezuela.* Correo electrónico jokmarquez82@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0336-9236>

Elkis Weinhold: *Doctora en Electroquímica, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela. Miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias, ULA, Mérida-Venezuela.* Correo electrónico: elkisweinhold@gmail.com

Keyla Márquez: *Msc. en Electroquímica Fundamental y Aplicada, Universidad de Los Andes (ULA). Ingeniera Industrial. Miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ingeniería, núcleo universitario Alberto Adriani (NUAA), ULA, El Vigía, Mérida, Venezuela.* Correo electrónico: keylaenator@gmail.com

Yanpiero Balladores: *Dr. En Electroquímica Fundamental y Aplicada. Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela. Investigador en el Instituto*

Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Correo electrónico: yanpiero@gmail.com